МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.793.14 DOI 10.12737/20221

Технология нанесения защитных покрытий на поршневые кольца дизельных двигателей*

И. Н. Кравченко[1], Е. М. Зубрилина[2], Т. А. Чеха[3], М. В. Добычин[4]**

[1,3,4] Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

[2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Technique of applying protective coatings on diesel piston rings ***

I. N. Kravchenko[1], E. M. Zubrilina[2], T. A. Czecha[3], M. V. Dobychin[4]**

[1,3,4] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель работы заключается в поиске новых перспективных конструкционных малоактивируемых материалов. Описаны дисперсно-упрочненные микролегированные сплавы на основе хрома, которые показывают хорошие физико-механические свойства в исходном состоянии. Приведены результаты сравнительных исследований прочностных свойств хромовых покрытий, полученных газотермическими и гальваническими методами нанесения на поршневые кольца. Это позволяет выявить и оценить преимущества данных покрытий в зависимости от эксплуатационных характеристик. Построены экспериментальные зависимости износа хромированных колец от наработки двигателя. Приведены результаты ускоренных и натурных испытаний различных двигателей по определению влияния состава хромовых покрытий на величину и характер изменения коэффициента трения в зависимости от нагрузки. Определена эффективность применения исследованных покрытий для поршневых колец дизельных двигателей.

The work objective is to search for new non-conventional structural low-activated materials. The dispersion-strengthened micro-alloyed chrome-based alloys that show high mechanical-and-physical properties under the initial condition are described. The results of the comparative studies of the chromium structural behavior obtained by the galvanic and hot spraying methods applied to the piston rings are quoted. This allows identify and assess the advantages of these coatings depending on the performance. Chromium rings wear – engine operating time experimental dependences are shown. The results of the quick and full-scale testing of various engines to determine the effect of the chromium coating composition on the size and behavior of the friction factor depending on the load are described. The feasibility of applying the diesel piston ring coatings under study is assessed.

Ключевые слова: адгезионная и когезионная прочность, газотермические и гальванические хромовые покрытия, износостойкость, коррозионная стойкость, поршневое кольцо, твердость, термостойкость, трение, шаржирование, эффект Ребиндера.

Keywords: adhesive and cohesive strength, gas-thermal and electrolyte chrome coatings, wear resistance, corrosion resistance, piston ring, hardness, heat resistance, friction, charging, Rehbinder effect.

Введение. Опыт эксплуатации сельскохозяйственных машин показывает, что надежность дизельных двигателей в значительной степени зависит от характеристик деталей цилиндропоршневой группы и прежде всего — от скорости изнашивания поршневых колец, которая определяется не только вибрационным и напряженно-деформируемым состоянием, но также составом и технологией нанесения защитных покрытий [1 – 4].

Применение гальванических хромовых покрытий позволяет лишь частично решать задачи, связанные с повышением долговечности деталей. Так, широко применяемый гальванический способ нанесения хрома на рабочую поверхность поршневых колец снижает интенсивность изнашивания всего на 25–30 %, что явно недостаточно, особенно при повышенных давлениях сгорания в цилиндре, характерных для высокофорсированных дизелей [5, 6].

Повышение уровня форсирования дизелей ограничивает области применения данных технологий нанесения гальванических покрытий. В качестве причин могут быть названы температурная нестабильность, наводороживание поверхности, низкая смачиваемость маслом и возникающие прожоги и схватывания, а также недостаточная механическая прочность при увеличении толщины [7]. Кроме того, необходимо отметить высокую энергоемкость,

---

* Работа выполнена в рамках инициативной НИОКР.

** E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru, elena-zubrilina@rambler.ru, vivat91@mail.ru, mr.kep@yandex.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

трудоемкость процесса. Следует особо сказать о токсичности выделений и стоков. Таким образом, перечисленные факторы стимулируют поиск эффективных ресурсосберегающих технологий.

В сложившихся условиях все более актуальной представляется необходимость изыскания путей замены гальванического хрома на хромсодержащие газотермические покрытия.

В настоящее время для повышения долговечности и работоспособности деталей в различных отраслях промышленности используются газотермические хромовые покрытия [8–11], которые придают поверхностным слоям уникальные свойства, существенно отличающееся от свойств материала основы. Это позволяет многократно повышать триботехнические характеристики таких покрытий.

В статье рассматриваются процессы изменения триботехнических характеристик газотермических хромовых покрытий при варьировании их элементного состава в диапазоне нагружений поршневых колец дизельных двигателей.

О высоких характеристиках этих покрытий по антифрикционным свойствам свидетельствуют:

— результаты исследований характеристик трения и износа хромовых покрытий в условиях работы деталей цилиндропоршневой группы высокофорсированного дизельного двигателя [12–14];

— опыт эксплуатации поршневых колец.

В работе представлен ряд экспериментов, позволяющих определить, каким образом основные технологические параметры газотермического и гальванического нанесения хромовых покрытий влияют на структуру и свойства получаемого слоя. В ходе исследования сравнивались свойства хромовых покрытий, полученных двумя указанными методами, и результаты их испытаний. На основе полученных таким образом данных оценивались эксплуатационные характеристики и затраты, связанные с перевооружением или модернизацией производства.

Цель работы и задач исследования. Целью работы является разработка прогрессивных технологий нанесения газотермических защитных покрытий на поршневые кольца дизельных двигателей при работе в условиях высоких температур и давлений, а также оценка возможности их применения взамен гальванического хромирования.

Основными задачами исследования являются:

— определение физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик хромовых покрытий применительно к работе поршней и поршневых колец;

— оценка влияния этих покрытий на технико-экономические характеристики дизельных двигателей.

Материалы и методика исследования. Программа исследований предусматривала оценку усталостных характеристик с использованием регрессионного анализа. В качестве материала подложки исследовали покрытия, полученные:

— из порошков хрома ПХ1М (порошкообразное вещество, состоящее из соединения хрома с другими компонентами в малых количествах), нанесенные плазменным напылением в азотной плазме;

— из пруткового микролегированного хрома ВХ2К, нанесенного газопламенным напылением;

— из сульфатно-фторидного электролита, нанесенного гальваническим осаждением.

Химический состав малолегированных сплавов на основе хрома приведен в таблице.

Таблица

Химический состав малолегированных сплавов на основе хрома

Сплав	Содержание элементов, мас. %									
	Fe	*La*	*Ta*	*V*	*Re*	*Zr*	*C*	*O*	*N*	*H*
ВХ2К	–	0,3–0,4	0,3–0,5	0,3–0,5	–	–	0,001–0,01	0,001–0,03	0,002–0,1	0,001
ВХМ	–	0,1–0,2	0,1–0,4	0,5–0,6	0,2–0,4	0,05–0,07	0,005	0,006	0,01	0,001
*ХР*3	0,2–0,5	0,2–0,5	–	–	–	–	0,01–0,02	0,005–0,08	0,005–0,04	0,001

Режимы нанесения хромовых покрытий оптимизированы по общепринятым методикам [15,16]. Для количественного определения прочности сцепления используют метод прямого отрыва покрытия от подложки либо сдвига относительно последней. С этой целью к поверхности покрытия приклеивают либо припаивают металлические стержни, к которым затем прикладывается растягивающее усиление. К недостаткам данного метода следует отнести вероятность проникновения материала припоя либо клея на границу раздела «покрытие — подложка» и изменения характеристик сцепления. В случае прямого отрыва разрыв обычно начинается в точке, где локальное напряжение превышает локальную прочность. В этом случае результаты измерения усилий отрыва нельзя отнести к определенной площади. Однако для оценки работоспособности покрытия усилие отрыва к проекции его площади соотносится с плоскостью, перпендикулярной действующей силе. При определении прочности сцепления методом сдвига усилие направлено на слой покрытия касательно поверхности подложки. Испытания на износостойкость проводили на машине трения во всей области скоростей и давлений трения кольца по гильзе цилиндра.

Результаты исследований, их анализ и обсуждение. *Адгезионные свойства покрытий.* Прочность сцепления покрытия — как на отрыв, так и на сдвиг — снижается в зависимости от толщины покрытия, что обусловлено его напряженным состоянием. По абсолютной величине у газотермических покрытий прочность сцепления примерно в 2 раза ниже, чем у гальванических (рис. 1). Это связано с большой разницей коэффициентов линейного расширения покрытия и основы.

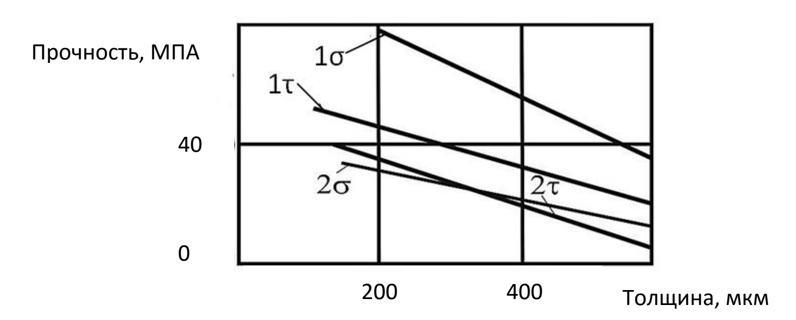


Рис. 1. Зависимость от толщины прочности сцепления покрытия (на отрыв σ и на сдвиг τ) поршневых колец из серого легированного чугуна: 1 — хром гальванический; 2 — хром газотермический

Очевидно, что для повышения адгезионных свойств покрытий необходимо применять специальные методы, например, подслои, экзотермические реагирующие компоненты, подбор формы канавки на поршневом кольце и др.

Термостойкость. Исследование газотермических покрытий показало следующие их преимущества:

— выдерживают давление до схватывания в 2 раза выше, чем гальванический хром, при граничном трении и в 1,5 раза выше — при сухом трении (рис. 2);

— более устойчивы к температурному разрушению и не подвержены снижению твердости в зависимости от температуры.

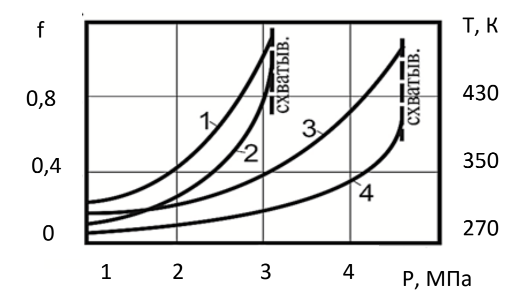


Рис. 2. Давление схватывания хромовых покрытий в условиях сухого трения: 1, 2 — гальванический хром; 3, 4 — газотермический хром

Анализ полученных результатов показывает, что использование исследованных покрытий для поршневых колец обеспечивает лучшие характеристики трения сопряжения «гильза — поршневое кольцо» по сравнению с используемым гальваническим хромовым покрытием. Однако при повышении общих нагрузок коэффициенты трения исследованных покрытий увеличиваются. Это свидетельствует о том, что для достижения большего эффекта использования перспективных покрытий поршневых колец целесообразно одновременно проработать возможность снижения действующих нагрузок в сопряжениях.

Коррозионная стойкость. Защитные свойства газотермических хромовых покрытий хуже, чем гальванических, что обусловлено их большей пористостью (рис. 3). Газопроницаемость покрытий пропорциональна площади пор, коррозионный ток (токовый показатель) резко возрастает после достижения 10 % пористости. Это свидетельствует об увеличении размеров пор. При этом снижается число адгезионных связей за счет коррозии чугуна на границе «кольцо — покрытие». Кроме того, наличие минеральных кислот (серной, соляной и др.) приводит к поверхностной коррозии самого покрытия и снижению поверхностной прочности [7, 14] (эффект Ребиндера — адсорбционное понижение прочности твердых тел). Увеличение пористости усугубляет этот процесс, что сказывается на работе двигателя при использовании сернистого топлива.

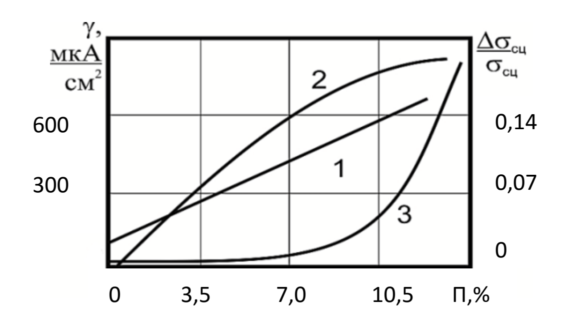


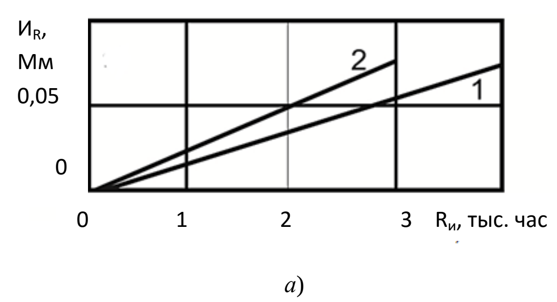
Рис. 3. Влияние пористости хромовых покрытий на газопроницаемость по Банзену (1), плотность коррозионного тока (2) и снижение прочности сцепления (3) после выдержки в 3-процентном растворе *NaCl*

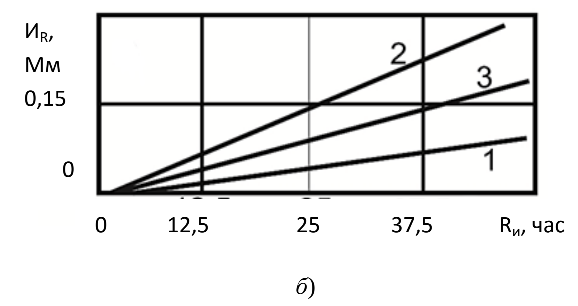
Напряженное состояние и характеристики разрушения. Результаты исследований внутренних напряжений показывают, что гальванические хромовые покрытия имеют значительные конденсационные напряжения, меняющие знак по мере увеличения толщины и релаксирующие путем растрескивания покрытия. Газотермические покрытия, благодаря своей демпферной структуре, обладают меньшими по величине сжимающими конденсационными напряжениями, но достаточно большими термическими, релаксирующими путем разрыва адгезионных связей.

Анализ исследований критического коэффициента интенсивности напряжений и хрупкости показывает преимущества газотермических покрытий. Кроме того, в гальванических покрытиях когезионная прочность ниже адгезионной и снижается в зависимости от толщины покрытия. При силовом воздействии газотермические хромовые покрытия разрушаются адгезионно, а гальванические — когезионно, причем прочность газотермических покрытий вдвое ниже.

Износостойкость. Благодаря меньшему коэффициенту трения и большей пористости, газотермические хромовые покрытия обладают меньшим износом в паре с чугуном при сухом и граничном трении.

Однако необходимо заметить, что в дизельном двигателе при работе на сернистом топливе газотермические покрытия показывают больший износ, чем гальванические (рис. 4). Здесь, по-видимому, причин несколько:
— во-первых, проявление упоминавшегося выше эффекта Ребиндера;
— во-вторых, шаржирование (насыщение поверхности абразивными материалами) более пористого и мягкого газотермического покрытия частицами абразива, причем шаржируемые материалы выполняют роль рабочего тела и по сути являются расходным материалом.





а) *б*)

Рис. 4. Зависимость износа верхних хромированных колец от наработки двигателя: натурные испытания двигателя СМД-63 (*а*); ускоренные испытания двигателя Д-245 (*б*); 1 — хром гальванический; 2, 3 — хром газотермический ПХ1М и ВХ2К соответственно

Таким образом, анализ проведенных исследований показывает, что для эффективного применения в качестве защитных покрытий поршневых колец дизельных двигателей перспективны микролегированные сплавы хрома типа ВХ2К, позволяющие достичь меньшего размера пор и обладающие большей твердостью и износостойкостью.

Выводы

1. Проведены испытания по определению триботехнических характеристик хромовых покрытий, полученных методом газотермического напыления в сравнении с гальваническим хромовым покрытием. В результате показана возможность существенного повышения работоспособности деталей и улучшения их характеристик, что обеспечивает устойчивую работу высоконагруженных деталей форсированных двигателей.

2. Результаты исследований по многократному повышению износостойкости деталей и экологичности производства при использовании в узлах трения газотермических хромовых покрытий (вместо гальванических) позволяют рекомендовать их на поршневых кольцах выпускаемых дизельных двигателей.

3. Разработанная технология при правильном подборе напыляемых материалов и режимов их нанесения может успешно применяться при восстановлении деталей с изношенными хромовыми покрытиями.

Библиографический список

1. Наноматериалы в техническом сервисе сельскохозяйственных машин / В. И. Черноиванов [и др.]. — Москва : ГОСНИТИ, 2010. — 67 с.

2. Повышение послеремонтной безотказности ДВС и трансмиссий тракторов применением наноматериалов / В. П. Лялякин [и др.] // Труды ГОСНИТИ. — 2013. — Т. 113. — С. 90–98.

3. Соловьев, Р. Ю. Нетрадиционная триботехника в АПК / Р. Ю. Соловьев // Вестник Рос. акад. с.-х. наук. — 2013. — № 1. — С. 76–78.

4. Безызносная эксплуатация двигателя внутреннего сгорания // под ред. Р. Ю. Соловьева. — Москва : ГОСНИТИ, 2015. — 262 с.

5. Мяконьков, М. Б. Совершенствование технологии нанесения износостойких покрытий на поршневые кольца судовых дизелей с учетом их вибрационного и напряженно-деформированного состояния : дис ... канд. техн. наук / М. Б. Мяконьков. — Санкт-Петербург, 2012. — 135 с.

6. Кравченко, И. Н. Обеспечение надежности адгезионной связи плазменных покрытий на поршневых кольцах ДВС с учетом их теплового и термонапряженного состояния / И. Н. Кравченко, Е. М. Бобряшов, А. Ф. Пузряков // Международный журнал экспериментального образования. — 2013. — № 10, ч. 2. — С. 358–361.

7. Сравнение коррозионной стойкости покрытия гальванического хрома и покрытия на основе карбида вольфрама, нанесенных высокоскоростным газопламенным напылением (HVOF) / С. Л. Балдаев [и др.] // Энциклопедия инженера-химика. — 2009. — № 11. — С. 13–18.

8. Пилипенко, Н. Н. Малоактивируемые сплавы на основе хрома / Н. Н. Пилипенко // Вопросы атомной науки и техники. — 2007. — № 4. — С. 198–203.

9. Новые подходы к повышению ресурса деталей машиностроения методами газотермического напыления наноструктурированных материалов / А. Ф. Пузряков [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2014. — № 6. — С. 32–35.

10. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения / И. Н. Кравченко [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 3 (82). — С.19–28.

11. Газотермическое напыление / Л. Х. Балдаев [и др.]. — 2-е изд. — Москва : Старая Басманная, 2015. — 539 с.

12. Мощенок, В. И. Определение триботехнических характеристик композитных ионно-плазменных покрытий для поршневых колец дизельных двигателей / В. И. Мощенок, Е. А. Нестеренко, А.В. Сагалович // Вестник Харьков. нац. автомобильно-дорож. ин-та. — 2009. — № 46. — С. 111–115.

13. Технология нанесения износостойкого покрытия стальных поршневых колец / Г. А. Околович [и др.] // Обработка металлов. — 2012. — № 4 (57). — С. 50–52.

14. Кравченко, И. Н. Исследования прочностных свойств и эксплуатационных характеристик хромовых покрытий, полученных различными методами напыления / И. Н. Кравченко, Е. М. Зубрилина, С. Г. Марковчин // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2012 — № 6. — С. 27–30.

15. Кравченко, И. Н. Экспериментально-расчетная методика определения прочностных характеристик плазменнонапыленных покрытий / И. Н. Кравченко // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2006. — № 3. — С. 16–18.

16. Лунёв, В. М. Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения / В. М. Лунев, О. В. Немашкало // Журнал физики и инженерии поверхности. — 2010. — Т. 8. — № 1. — С. 64–71.

References

1. 1.Chernoivanov, V.I., et al. Nanomaterialy v tekhnicheskom servise sel'skokhozyaystvennykh mashin. [Nanomaterials in the technical service of agricultural machinery.] Moscow: GOSNITI, 2010, 67 p. (in Russian).

2. Lyalyakin, V.P., et al. Povyshenie posleremontnoy bezotkaznosti DVS i transmissiy traktorov primeneniem nanomaterialov. [Improvement of post overhaul ICE reliability and tractor transmissions by using nanomaterials.] Trudy GOSNITI, 2013, vol. 113, pp. 90–98 (in Russian).

3. Solovyev, R.Y. Netraditsionnaya tribotekhnika v APK. [Nonconventional triboengineering in agroindustrial complex.] Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk, 2013, no. 1, pp. 76–78 (in Russian).

4. Solovyev, R.Y. ed. Bezyznosnaya ekspluatatsiya dvigatelya vnutrennego sgoraniya. [Wearless operation of the internal combustion engine.] Moscow: GOSNITI, 2015, 262 p. (in Russian).

5. Myakonkov, M.B. Sovershenstvovanie tekhnologii naneseniya iznosostoykikh pokrytiy na porshnevye kol'tsa sudovykh dizeley s uchetom ikh vibratsionnogo i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya: dis ... kand. tekhn. nauk. [Im-

proving wearfacing technique for piston rings of marine diesel engines based on their vibration and stress-strain state: Cand.Sci. (Eng.) diss.] St. Petersburg, 2012, 135 p. (in Russian).

6. Kravchenko, I.N., Bobryashov, E.M., Puzryakov, A.F. Obespechenie nadezhnosti adgezionnoy svyazi plazmennykh pokrytiy na porshnevykh kol'tsakh DVS s uchetom ikh teplovogo i termonapryazhennogo sostoyaniya. [Ensuring the reliability of the adhesive bond of plasma coatings on the piston rings engines based on their thermal and thermal stress state.] Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya, 2013, no. 10, part 2, pp. 358–361 (in Russian).

7. Baldayev, S.L., et al. Sravnenie korrozionnoy stoykosti pokrytiya gal'vanicheskogo khroma i pokrytiya na osnove karbida vol'frama, nanesennykh vysokoskorostnym gazoplamennym napyleniem (HVOF). [Comparison of corrosion resistance of galvanic chromium coating and coating on basis of tungsten carbide, applied by method of high-speed flame spraying (NVOF).] Encyclopaedia of Chemical Engineer, 2009, no. 11, pp. 13–18 (in Russian).

8. Pilipenko, N.N. Maloaktiviruemye splavy na osnove khroma. [Low activation chromium alloys.] Problems of Atomic Science and Technology, 2007, no. 4, pp. 198–203 (in Russian).

9. Puzryakov, A.F., et al. Novye podkhody k povysheniyu resursa detaley mashinostroeniya metodami gazotermicheskogo napyleniya nanostrukturirovannykh materialov. [New approaches to improve of service life of mechanical engineering parts by gas-thermal spraying methods of nanostructured materials.] Repair, Reconditioning, Modernization, 2014, no. 6, pp. 32–35 (in Russian).

10. Kravchenko, I.N., et al. Resursosberegayushchie tekhnologii polucheniya funktsional'nykh nanostrukturirovannykh pokrytiy vysokoskorostnymi metodami naneseniya. [Resource-saving technologies of derivatization of functional nanostructured coatings by high-speed application methods.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 3 (82), pp. 19–28 (in Russian).

11. Baldayev, S.L., et al. Gazotermicheskoe napylenie. [Gasometric sputtering.] 2nd ed. Moscow: Staraya Basmannaya, 2015, 539 p. (in Russian).

12. Moshchenok, V.I., Nesterenko, E.A., Sagalovich, A.V. Opredelenie tribotekhnicheskikh kharakteristik kompozitnykh ionno-plazmennykh pokrytiy dlya porshnevykh kolets dizel'nykh dvigateley. [Determination of tribological characteristics of the composite ion-plasma coatings for diesel piston rings.] Vestnik KhGADTU, 2009, no. 46, pp. 111–115 (in Russian).

13. Okolovich, G.A., et al. Tekhnologiya naneseniya iznosostoykogo pokrytiya stal'nykh porshnevykh kolets. [Technology for deposition of wear-resistant coating of piston rings.] Obrabotka Metallov, 2012, no. 4 (57), pp. 50–52. (in Russian).

14. Kravchenko, I.N., Zubrilina, E.M., Markovchin, S.G., Shiyan, A.V. Issledovaniya prochnostnykh svoystv i ekspluatatsionnykh kharakteristik khromovykh pokrytiy, poluchennykh razlichnymi metodami napyleniya. [Study of strength properties and operating characteristics of chromium coatings made by various spraying methods.] Repair, Reconditioning, Modernization, 2012, no. 6, pp. 27–30 (in Russian).

15. Kravchenko, I.N. Eksperimental'no-raschetnaya metodika opredeleniya prochnostnykh kharakteristik plazmennonapylennykh pokrytiy. [Experimental and computational procedure of determining the strength characteristics of plasma sprayed coatings.] Repair, Reconditioning, Modernization, 2006, no. 3, pp. 16–18 (in Russian).

16. Lunev, V.M., Nemashkalo, O.V. Adgezionnye kharakteristiki pokrytiy i metody ikh izmereniya. [Adhesion characteristics of coatings and methods of their performance measurement.] Journal of Surface Physics and Engineering, 2010, vol. 8, no. 1, pp. 64–71 (in Russian).

Поступила в редакцию 09.03.2016
Сдана в редакцию 09.03.2016
Запланирована в номер 07.07.2016